

A közvetlen nyomatékszabályozás elve, megvalósítása, és főbb tulajdonságai aszinkron motoros hajtások esetében

The principle, realization and main features of direct torque control in the case of AC induction motor drives

*VAJSZ Tibor, MSc hallgató, 1.
Dr. SZÁMEL László, egyetemi docens, 2.
RÁCZ György, doktorandusz, 3.*

1. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Irányítástechnika és Informatika Tanszék
H-1117 Budapest, Magyar tudósok körútja 2.

www.iit.bme.hu

E-mail: vajti58@gmail.com

2. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamos Energetika Tanszék
1111. Budapest, Egry József utca 18.

www.vet.bme.hu

Tel.: +36 1 4633608 Fax: +36 1 4633600

E-mail: szamel.laszlo@vet.bme.hu

3. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Irányítástechnika és Informatika Tanszék
H-1117 Budapest, Magyar tudósok körútja 2.

www.iit.bme.hu

Tel.: (+36 1) 463-1575

E-mail: gyuriracz@iit.bme.hu

Abstract

Field oriented control (FOC) is a widespread method in the controlling of AC induction motors requiring high dynamic performance. However, this method has numerous drawbacks. This method is complex, requires much computation and is parameter-sensitive. These problems led to the inventions of different control methods. One of these is direct torque control. This article presents the principle, a possible realization and the main features of direct torque control.

Összefoglaló

A mezőorientált szabályozás elterjedt módszer a jó dinamikát igénylő aszinkron motoros hajtások körében. Ugyanakkor, ez a módszer több hátránnyal is rendelkezik: bonyolult, számításigényes, és paraméter-érzékeny. Ezek a problémák vezettek más filozófiákon alapuló módszerek kifejlesztéséhez. Ezek közül az egyik a közvetlen nyomatékszabályozás. Ez a cikk bemutatja a közvetlen nyomatékszabályozás alapelvét, egyik lehetséges megvalósítását, és főbb jellemzőit.

Kulcsszavak:

közvetlen nyomatékszabályozás, aszinkron motor, mezőorientált szabályozás, inverter, hajtás

1. A KÖZVETLEN NYOMATÉKSZABÁLYOZÁS ALAPELVE

Az aszinkron gépek Park-vektoros nyomatékképlete szerint: [1]

$$\overline{m} = \frac{3}{2} p \overline{\psi} \times \overline{i} = \frac{3}{2} p \overline{\psi}_r \times \overline{i} \quad (1)$$

Ahol:

\overline{m} : a gép által kifejtett nyomaték Park-vektora

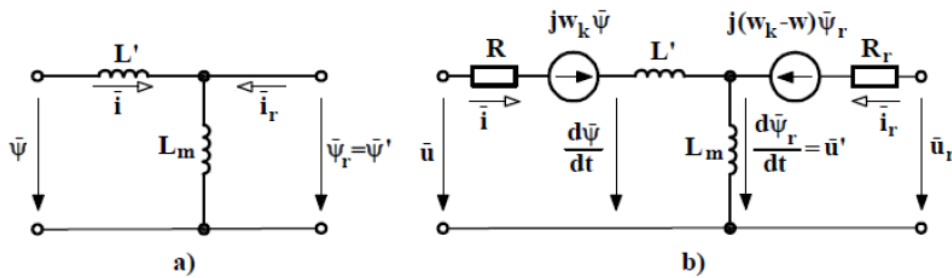
p : a gép póluspárszáma

$\overline{\psi}$: az állórész-fluxus Park-vektora

$\overline{\psi}_r$: a (redukált) forgórész-fluxus Park-vektora

\overline{i} : az állórész áramának Park-vektora

Ez az egyenlet az aszinkron gépek forgórész-szórás nélküli helyettesítő képére vonatkozik, melyet az 1. ábrán láthatunk. Az egyenlet pillanatértékekre vonatkozik, és tranziens üzemállapotban is érvényes.



1. ábra: Forgórész szórás nélküli helyettesítő képek a: fluxusokra, b: feszültségekre [1]

A helyettesítő képen található fontosabb paraméterek értelmezése a következő:

L' : az állórész tranziens induktivitása, $L' \approx L_s + L_{rs}$, azaz kb. az állórész szórási induktivitásának és a forgórész szórási induktivitásának az összege

L_m : az állórész- és a forgórész kölcsönös induktivitása, $L_m = L - L'$, azaz az állórész teljes induktivitásának és az állórész tranziens induktivitásának a különbsége

R : az állórész ellenállása

w_k : a közös koordináta-rendszer villamos szögsebessége

w : a gép forgórészének villamos szögsebessége

u' : a gép tranziens feszültségének Park-vektora

\overline{u} : az állórész feszültségének Park-vektora

Az állórész áramának helyére az $\overline{i} = \frac{\overline{\psi} - \overline{\psi}_r}{L'}$ összefüggést behelyettesítve, azt kapjuk, hogy:

$$\overline{m} = \frac{3}{2} p \frac{\overline{\psi}_r \times \overline{\psi}}{L'} \quad (2)$$

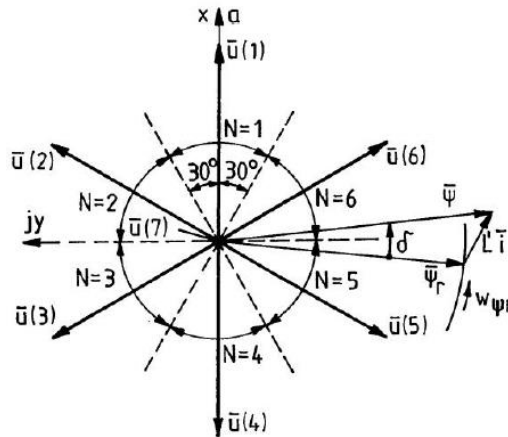
Ebből a nyomaték abszolútértéke:

$$m = \frac{3}{2} p \frac{\Psi_r \Psi \sin \delta}{L'} \approx \frac{3}{2} p \frac{\Psi_r \Psi \delta}{L'} \quad (3)$$

Itt δ a $\overline{\psi}_r$ forgórész-fluxusvektor és a $\overline{\psi}$ állórész-fluxusvektor közötti kis szöget jelöli. Állandósult állapotban, álló koordináta-rendszerben a $\overline{\psi}_r$ forgórész-fluxusvektor kör alakú pályán forog egyenletes szögsebességgel, míg a $\overline{\psi}$ állórész-fluxusvektor a

$$\left(\frac{d\overline{\psi}}{dt} \right)_k = \overline{u}(k) - R\overline{i} \approx \overline{u}(k) \quad (4)$$

egyenletnek megfelelően az $\bar{u}(k)$ kapocsfeszültség-vektor által vezérelhető pályát ír le. A kétszintű feszültséginverter Park-vektor ábrájában (2. ábra) összesen 7-féle kapocsfeszültség-vektor található, így az invertert vezérlő elektronika minden egyes pillanatban 7-féle $\left(\frac{d\bar{\Psi}}{dt}\right)_k$ állórész-fluxus sebességvektor közül tudja kiválasztani a gép állórészére kapcsolandót.



2. ábra: Az inverter feszültségvektorai és a fluxusvektorok [1]

A $\bar{\Psi} = \bar{\Psi}_r + L'\bar{i}$ állórész-fluxusvektor amplitúdója és szöge az $L'\bar{i}$ tag miatt sokkal gyorsabban változtatható, mint a $\bar{\Psi}_r$ forgórész-fluxusvektor amplitúdója és szöge. A nyomatékot a leggyorsabban a két fluxusvektor közötti δ szöggel lehet változtatni. A leggyorsabb δ változást a $\bar{\Psi}$ -re kb. merőleges feszültségvektorok eredményezik, mivel a δ szög kicsi.

Példaként tételezzük fel az $m > 0$ és $w_{\Psi r} > 0$ motoros üzemet, valamint az állórész- és a forgórész fluxusvektorok 2. ábra szerinti helyzetét. A leggyorsabb nyomaték növekedést az $\bar{u}(1)$ feszültségvektor motorra való kapcsolásával lehet elérni, míg a leggyorsabb nyomaték csökkenést az $\bar{u}(4)$ feszültségvektorral lehet elérni. Az $\bar{u}(7) = 0$ feszültségvektor (az 2. ábra közepén található nullvektor) megállítja a $\bar{\Psi}$ vektort, így ekkor a δ szög, és ebből következően a nyomaték csökken. A nyomatékot tehát egyszerű kétpontszabályozással lehet az alapjel által előírt értékre szabályozni.

Még mindig a példánál maradva, nézzük, hogy hogyan lehet változtatni az állórész-fluxus amplitúdóját. A fluxus amplitúdóját leggyorsabban az $\bar{u}(6)$ és az $\bar{u}(5)$ feszültségvektorokkal lehet növelni, míg a leggyorsabb fluxus-csökkenést az $\bar{u}(3)$ és az $\bar{u}(2)$ feszültségvektorokkal lehet elérni. Az $\bar{u}(7)$ feszültségvektor nem változtatja a fluxust (viszont a nyomatékot csökkenti). Tehát az állórész-fluxus amplitúdóját szintén kétpontszabályozással lehet az előírt értékre szabályozni.

2. A KÖZVETLEN NYOMATÉKSZABÁLYOZÁS EGYIK LEHETSÉGES MEGVALÓSÍTÁSA

A $\bar{\Psi}$ fluxusvektor szöghelyzetét a 2. ábrának megfelelően hat darab 60°-os szektormmal jellemezve, az $N=1 \dots 6$ szektorszámától függő általános szabályok is megállapíthatók az optimális $\bar{u}(k)$ feszültségvektor kiválasztására. Ezeket a szabályokat a módszer implementálása során egy kapcsoló táblázatban szokták eltárolni. A kapcsoló táblázat megfelelő elemének kiválasztása, azaz az optimális $\bar{u}(k)$ feszültségvektor kiválasztása, három jel alapján történik: a $\Delta\Psi = \Psi_a - \Psi$ fluxusamplitúdó-hiba, a $\Delta m = m_a - m$ nyomatékhiba, és az N szektorszám alapján. Ezek alapján a szabályozás egyik lehetséges blokkvázlatát a 3. ábrán láthatjuk ($p = 1$ póluspárszámot feltételezve).

3. A KÖZVETLEN NYOMATÉKSZABÁLYOZÁS TULAJDONSÁGAI, FŐBB JELLEMZŐI

- a nyomaték és a fluxus *közvetlen* szabályozása [2]
- az állórész áramok és feszültségek *közvetett* szabályozása
- közelítőleg szinuszos állórész fluxusok és áramok
- nagyon jó dinamika
- a nyomaték- és a fluxus toleranciasávok megengedhető minimális szélessége az inverter maximálisan megengedhető kapcsolási frekvenciájának a függvénye

4. A KÖZVETLEN NYOMATÉKSZABÁLYOZÁS FŐBB ELŐNYEI

- rendkívül gyors nyomatékszabályozás (gyorsabb, mint a mezőorientált szabályozás esetében)
- nincs szükség koordináta-transzformációkra (ellentétben a mezőorientált szabályozással)
- nincs szükség impulzusszélesség-modulátorra (ellentétben a mezőorientáltan szabályozott hajtások többségével)
- a szabályozók robusztusak (egyszerű kétpontszabályozók, ellentétben a mezőorientáltan szabályozott hajtások többségével, ahol PI/PID típusú szabályozókat használnak) [3]
- egyszerű gépmodell (csak az állórész ellenállását használja, ellentétben a mezőorientált szabályozással, ahol az 1. ábrán látható gépmodell valamennyi elemére szükség van a szabályozás megvalósításához)
- az egyszerű gépmodellből következően, a szabályozás sokkal kevésbé paraméter-érzékeny, mint a mezőorientált szabályozás
- nincs szükség az állórész-fluxusvektor *pontos* helyzetének meghatározására, elegendő tudni az állórész-fluxusvektor *szektorszámát*. Ez azt jelenti, hogy elegendő 60° -os villamos szögnek megfelelő pontossággal ismerni az állórész-fluxusvektor helyzetét (ellentétben a mezőorientált szabályozással, ahol a forgórész-fluxusvektor helyzetét legalább $1,4^\circ$ -os villamos szögnek megfelelő pontossággal kell ismerni) [2].

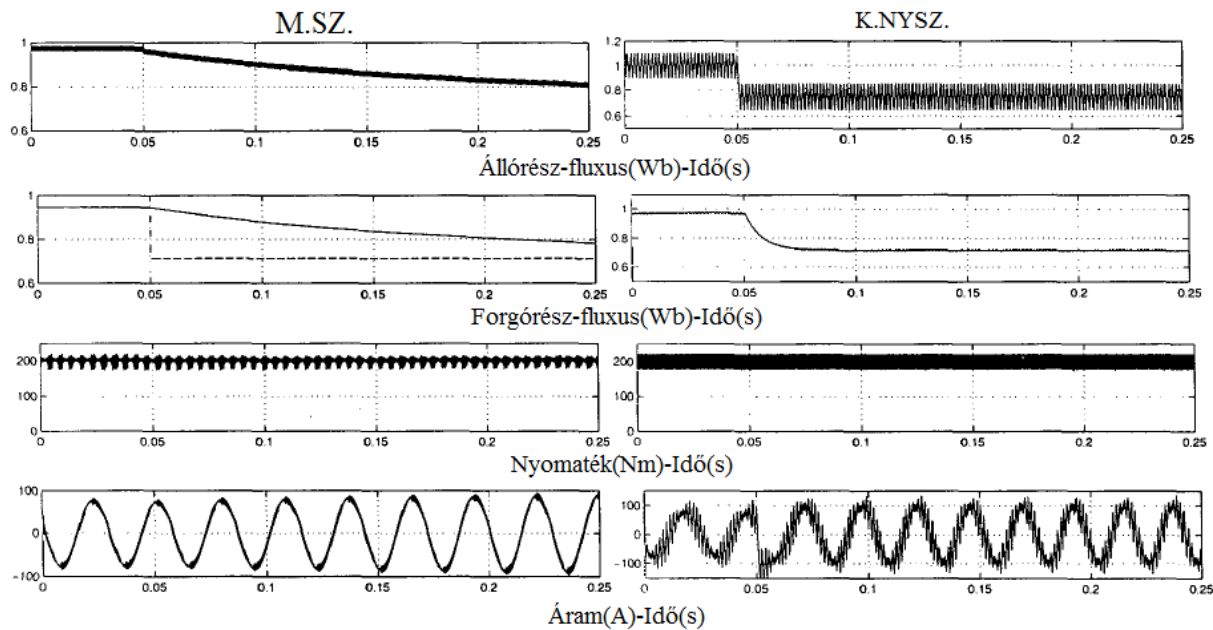
5. A KÖZVETLEN NYOMATÉKSZABÁLYOZÁS FŐBB HÁTRÁNYAI

- alacsony fordulatszámon, az állórész ellenállás melegeedésből adódó pontatlansága jelentős hibát okoz az állórész-fluxusvektor számításában. Amennyiben az $f_1 < 0,05f_{1n} = 0,05 \cdot 50 = 2,5 \text{ Hz}$ alapharmonikus frekvencia-tartományban tartós üzem is szükséges, bonyolultabb gépmodell alkalmazására van szükség. [3]
- folyamatosan változó kapcsolási frekvencia
- nagymértékű nyomatéklüktetés, melyet az inverter maximálisan megengedhető kapcsolási frekvenciájának növelésével lehet csökkenteni. Ehhez azonban drágább IGBT-kre lehet szükség, melyek bírják a nagyobb kapcsolási frekvenciákat is.

6. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

A 4. ábrán látható szimulációs eredmények a mezőorientáltan szabályozott (bal oldalt) aszinkron gép, illetve a közvetlen nyomatékszabályozott (jobb oldalt) aszinkron gép válaszait mutatják, a fluxus-alapjelnek a névleges értékről a névleges érték 75%-ra való egységugrásszerű csökkentése, és a nyomaték-alapjel névleges értéken való tartása mellett [4].

Az ábrákon jól látható, hogy a mezőorientált szabályozás esetében az állórész- és a forgórész fluxus lassan, a forgórész körüli üresjárási időállandónak megfelelően változik. Ezzel ellentétben, közvetlen nyomatékszabályozás esetében mindkét fluxus sokkal gyorsabban változik. Az állórész-fluxus változása rendkívül gyorsan megtörténik, mivel azt közvetlenül szabályozzuk, a forgórész-fluxus pedig a forgórész tranziens időállandójának megfelelően változik, ami még mindig sokkal kisebb, mint a forgórész körüli üresjárási időállandó. Észrevehető az is, hogy az állórész-fluxus sokkal jobban lüktet közvetlen nyomatékszabályozás esetében, mint a mezőorientált szabályozás esetében.



4. ábra: Mezőorientált szabályozás és közvetlen nyomatékszabályozás szimulációja [4]

Ennek az az oka, hogy közvetlen nyomatékszabályozás esetében kétpontszabályozókat alkalmazunk az állórész-fluxus előírt értéken való tartása érdekében.

Az is észrevehető az ábrákon, hogy a fluxusváltozási tranziensek alatt –amikor is a nyomaték a fluxusváltozás következtében megváltozna– a mezőorientált szabályozás sokkal lassabban képes a nyomatéket állandó értékre szabályozni, mint a közvetlen nyomatékszabályozás. Ezt mutatja a mezőorientált szabályozás nyomaték-idő függvényében a sok „gombóc”. A közvetlen nyomatékszabályozás esetében a „gombócok” olyan sűrűn helyezkednek el, hogy úgy tűnik, mintha nem is alakulnának ki „gombócok”. Ugyanakkor észlelhető az is, hogy a közvetlen nyomatékszabályozás esetében vastagabb a nyomaték-idő függvényhez tartozó vonal, mint a mezőorientált szabályozás esetében. Ez nagyobb mértékű nyomatéklüktetésre utal.

Az ábrákról leolvasható az is, hogy a mezőorientált szabályozás esetében az állórész áramok szinuszosak, míg közvetlen nyomatékszabályozás esetében csak durva közelítéssel tekinthetők szinuszosak. Ennek az oka az, hogy a közvetlen nyomatékszabályozás az állórész áramokat csak közvetetten szabályozza.

7. IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1]: Dr. Schmidt István, Dr. Veszprémi Károly: Hajtásszabályozások, egyetemi jegyzet, Budapest, 2012
- [2]: Peter Vas: Sensorless Vector And Direct Torque Control, Oxford University Press, Oxford, 1998
- [3]: Dr. Schmidt István, Dr. Vincze Gyuláné, Dr. Veszprémi Károly: Villamos szervo- és robothajtások, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000
- [4]: Hoang Le-Huy: Comparison of Field-Oriented Control and Direct Torque Control for Induction Motor Drives, IEEE, Sainte-Foy, 1999